

## © EPODOC / EPO

PN - DE19959861 A 20010613

AB - The invention relates to a method for producing a crystallized ceramic layer by means of laser annealing, whereby: a generating device (10), which has at least one pulse laser (22), generates a first laser beam (16) and a second laser beam (18) that is spatially separate therefrom; a shifting device (12) **temporally** shifts the second laser beam (18) with regard to the first laser beam (16); a combining device (14) combines both spatially separate laser beams (16, 18) to form an output beam (20), whereby the pulse duration of the output beam (20) is controlled by controlling the **temporal** shifting of the second laser beam (18) with regard to the first laser beam (16), and; the temperature profile in the ceramic layer is adjusted by controlling the pulse duration of the output beam (20). The invention also relates to a laser system which is especially developed for carrying out said method and which comprises: a generating device (10), which has at least one pulse laser (22) and which is provided for generating a first laser beam (16) and a second laser beam (18) that is spatially separate therefrom; a shifting device (12) which is provided for **temporally** shifting the second laser beam (18) with regard to the first laser beam (16), and comprises; a combining device (14) which is provided for combining both spatially separate laser beams (16, 18) to form an output beam (20).

EC - H01L21/316D (N)

ICO - T01L21/314E2L (N)

PA - KERNFORSCHUNGSANLAGE JUELICH (DE)

IN - BALDUS OLIVER (DE); WASER RAINER (DE); KRASSER WOLFGANG (DE)

AP - DE19991059861 19991210

PR - DE19991059861 19991210

DT - \*\*

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 199 59 861 A 1**

⑤① Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**B 23 K 26/00**  
H 01 S 3/23  
H 01 S 3/10

⑳ Aktenzeichen: 199 59 861.4  
㉔ Anmeldetag: 10. 12. 1999  
㉕ Offenlegungstag: 13. 6. 2001

DE 199 59 861 A 1

㉑ Anmelder:  
Forschungszentrum Jülich GmbH, 52428 Jülich, DE  
㉒ Vertreter:  
Bungartz Hublé, 50933 Köln

㉓ Erfinder:  
Waser, Rainer, Prof. Dr., 52076 Aachen, DE; Baldus,  
Oliver, 52074 Aachen, DE; Krasser, Wolfgang, Dr.,  
52428 Jülich, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

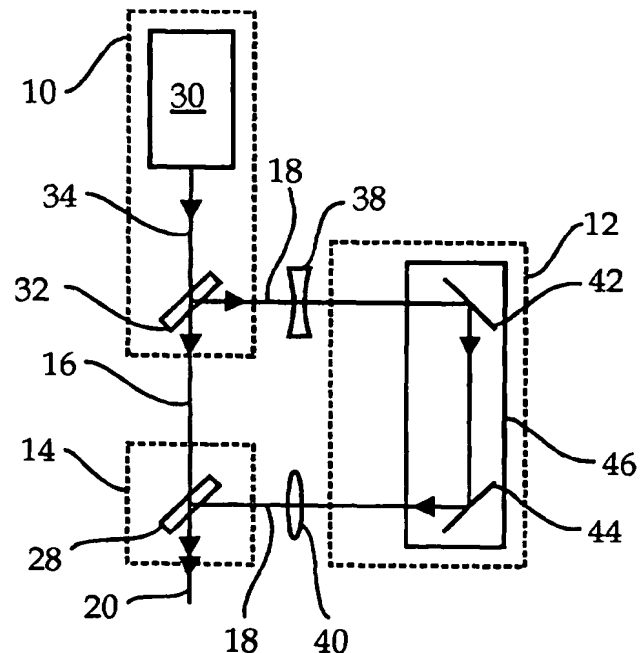
⑤4 Verfahren zur Herstellung einer kristallisierten keramischen Schicht durch Laser-Annealing

⑤7 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer kristallisierten keramischen Schicht durch Laser-Annealing, wobei:

- eine Erzeugungseinrichtung (10), die wenigstens einen Puls laser (22) aufweist, einen ersten Laserstrahl (16) und einen von diesem räumlich getrennten zweiten Laserstrahl (18) erzeugt;
- eine Verschiebungseinrichtung (12) den zweiten Laserstrahl (18) zeitlich gegenüber dem ersten Laserstrahl (16) verschiebt;
- eine Zusammenführungseinrichtung (14) die beiden räumlich getrennten Laserstrahlen (16, 18) in einem Ausgangsstrahl (20) zusammenführt, wobei die Pulsdauer des Ausgangsstrahls (20) durch Steuerung der zeitlichen Verschiebung des zweiten Laserstrahls (18) gegenüber dem ersten Laserstrahl (16) gesteuert wird; und
- das Temperaturprofil in der keramischen Schicht durch Steuerung der Pulsdauer des Ausgangsstrahls (20) eingestellt wird.

Die Erfindung betrifft außerdem ein Lasersystem, besonders entwickelt zur Ausführung dieses Verfahrens, mit:

- einer Erzeugungseinrichtung (10), die wenigstens einen Puls laser (22) aufweist und derart ausgebildet ist, dass sie einen ersten Laserstrahl (16) und einen von diesem räumlich getrennten zweiten Laserstrahl (18) erzeugt;
- einer Verschiebungseinrichtung (12), die derart ausgebildet ist, dass sie den zweiten Laserstrahl (18) zeitlich gegenüber dem ersten Laserstrahl (16) verschiebt; und
- einer Zusammenführungseinrichtung (14), die derart ausgebildet ist, dass sie die beiden räumlich ...



DE 199 59 861 A 1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer kristallisierten keramischen Schicht durch Laser-Annealing.

Ein derartiges Verfahren ist beispielsweise aus dem Artikel "Laser annealing of  $\text{SrTiO}_3$  thin films deposited directly on Si substrates at low temperature" der Autoren S. Otani, M. Kimura und N. Sasaki, veröffentlicht in Appl. Phys. Lett. 63/14 (1993), Seite 1889, dem Artikel "Laser-induced phase transformation from amorphous to perovskite in  $\text{PbZr}_{0,44}\text{Ti}_{0,56}\text{O}_3$  films with the substrate at room temperature" der Autoren X.M. Lu et. al., veröffentlicht in Appl. Phys. Lett. 65/16 (1994), Seite 2015, oder dem Artikel "Pulsed excimer (KrF) laser induced crystallization of  $\text{PbZr}_{0,44}\text{Ti}_{0,56}\text{O}_3$  amorphous films" der Autoren X.M. Lu et. al., veröffentlicht in Appl. Phys. Lett. 66/19 (1995), Seite 2481, bekannt. Dort wird beschrieben, wie mit Hilfe der Laser-Annealing-Technik eine Kristallisation in amorphen elektrokeramischen Schichten aus  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{PbZr}_{0,44}\text{Ti}_{0,56}\text{O}_3$  oder  $\text{SrTi}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$  erreicht werden kann.

Elektrokeramische Materialien eröffnen eine Fülle von Funktionen, die traditionelle Halbleitermaterialien wie Si oder GaAs nicht bieten können. Bei diesen Funktionen handelt es sich um ferroelektrische Polarisierung, hohe Kapazitätsdichten, magnetoresistive Eigenschaften, piezoelektrische Aktor- und Sensorfunktionen, Ionenleitung, Supraleitung, elektrooptische Aktivität, usw. Die Integration elektrokeramischer Materialien auf konventionellen integrierten Halbleiterschaltungen ist wünschenswert, da auf diesem Wege eine Kombination der elektrokeramischen Funktionen mit denen der Mikroelektronik und Mikromechanik erzielt werden kann. Als Beispiel hierfür sind nicht-flüchtige, ferroelektrische Speicher (sogenannte Fe-RAM) vorstellbar, die auf der Integration ferroelektrischer Keramiken auf Si-CMOS-Schaltungen beruhen.

Die Erzeugung qualitativ hochwertiger, dichter Keramikschichten erfordert in der Regel Temperaturen oberhalb von  $500^\circ\text{C}$ . Dies schränkt die Einsatzmöglichkeiten erheblich ein, da zum einen Bauelemente, wie zum Beispiel Transistoren, und Schichten, die unter der Keramikschicht liegen, nur mit großem Aufwand vor einer Oxidation durch die erhöhte Sauerstoff-Diffusionsrate geschützt werden können, und da zum anderen diese tiefer liegenden Schichten und Bauelemente durch eine Diffusion von Fremdelementen aus der Keramikschicht degradiert werden können. Außerdem kann die übliche Aluminium-Metallisierung erst nach der Keramikschicht aufgebracht werden, da diese Metallisierung nur bis zu einer Temperatur von etwa  $400^\circ\text{C}$  stabil bleibt.

Aufgrund dieser Einschränkungen ist es bisher nicht möglich, bereits fertige integrierte Schaltungen im Nachhinein um elektrokeramische Schichten mit den damit verbundenen neuen Funktionen zu ergänzen.

Die Laser-Annealing-Technik stellt einen Weg dar, die Temperaturbelastung des unter der Keramikschicht liegenden Substrats, das im obigen Beispiel die integrierte Halbleiterschaltung ist, gering zu halten und auf einen kurzen Zeitraum zu beschränken. Gemäß dieser Technik wird ein beispielsweise punkt- oder strichförmig fokussierter Laserstrahl von ausreichender Leistung mit kontrollierter Vorschubgeschwindigkeit über die "grüne" Keramikschicht bewegt (was auch als "Scanning" bezeichnet wird), um eine Kristallisation und Verdichtung der Keramikschicht zu erreichen.

Eine wichtige Randbedingung ergibt sich dabei aus dem Absorptionsspektrum der keramischen Dünnschichten, denn eine notwendige Voraussetzung für die Laser-Annealing-Technik ist die Absorption der Laserstrahlung in der

elektrokeramischen Dünnschicht. Zahlreiche elektrokeramische Materialien, wie zum Beispiel Erdalkalitanate, absorbieren lediglich im fernen infraroten (FIR) und im ultravioletten (UV) Bereich, während sie im sichtbaren und nahen und mittleren infraroten (NIR bzw. MIR) Bereich vollständig transparent sind und daher mit Licht aus diesen Wellenlängenbereichen nicht erwärmt werden können. Folglich müssen FIR- oder UV-Laser eingesetzt werden. FIR-Laser mit ausreichender Leistung stehen derzeit nicht zur Verfügung, und die Laserstrahlung der sehr leistungsstarken  $\text{CO}_2$ -Laser liegt im MIR- und NIR-Bereich und weist eine zu große Eindringtiefe auf. Daher wird bevorzugt die UV-Strahlung von Excimer-Lasern verwendet, deren Impulse eine ausreichende Leistung liefern.

Die bisher kommerziell verfügbaren Excimer-Laser weisen jedoch extrem kurze Pulsdauern von maximal 60 ns und zudem niedrige Pulsfrequenzen von maximal 100 Hz auf.

Ähnliche Leistungen wie die Excimer-Laser bieten zwar auch frequenzverdoppelte Cu-Dampf-Laser und frequenzverdreifachte Nd:YAG-Laser, beide Lasertypen sind derzeit aber mit Pulsdauern oberhalb von 40 ns kommerziell nicht verfügbar.

Diese extrem kurzen Pulsdauern führen dazu, dass der bestrahlte Oberflächenbereich der Keramikschicht nach einem Impuls nahezu vollständig abkühlt, bevor der nächste Impuls folgt. Um nach jeder Abkühlung wieder die für die gewünschte Kristallisation erforderliche Temperatur zu erreichen, muss daher eine niedrige Vorschubgeschwindigkeit und/oder eine hohe Flächenleistungsdichte des Laserstrahls gewählt werden. Eine niedrige Vorschubgeschwindigkeit bedeutet jedoch eine lange Bearbeitungszeit und somit geringe Produktivität. Eine hohe Flächenleistungsdichte erfolgt durch stärker Fokussierung des Laserstrahls auf den bestrahlten Oberflächenbereich der Keramikschicht, da die erwähnten kommerziell verfügbaren Puls laser keine beliebig hohen Pulsenergien liefern können. Eine starke Fokussierung führt aber zu großen Temperaturgradienten und somit zu unerwünschten starken thermisch induzierten Spannungen in der Keramikschicht. Außerdem kann die Wärme, die durch die Absorption der Laserstrahlung hauptsächlich in den oberflächennahen Bereichen der Keramikschicht entsteht, von dort wegen der extrem kurzen Pulsdauern nur in geringe Tiefen gelangen, so dass auch die Kristallisationstiefe gering ist.

Es ist daher Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren zur Herstellung einer kristallisierten keramischen Schicht durch Laser-Annealing zur Verfügung zu stellen, das eine höhere Vorschubgeschwindigkeit, eine niedrigere Flächenleistungsdichte und eine größere Kristallisationstiefe ermöglicht und qualitativ höherwertige und gleichmäßigere Ergebnisse erzielt.

Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren zur Herstellung einer kristallisierten keramischen Schicht durch Laser-Annealing gelöst, bei dem vorgesehen ist, dass:

- eine Erzeugungseinrichtung, die wenigstens einen Puls laser aufweist, einen ersten Laserstrahl und einen von diesem räumlich getrennten zweiten Laserstrahl erzeugt;
- eine Verschiebungseinrichtung den zweiten Laserstrahl zeitlich gegenüber dem ersten Laserstrahl verschiebt;
- eine Zusammenführungseinrichtung die beiden räumlich getrennten Laserstrahlen in einem Ausgangsstrahl zusammenführt, wobei die Pulsdauer des Ausgangsstrahls durch Steuerung der zeitlichen Verschiebung des zweiten Laserstrahls gegenüber dem ersten Laserstrahl gesteuert wird; und

– das Temperaturprofil in der keramischen Schicht durch Steuerung der Pulsdauer des Ausgangsstrahls eingestellt wird.

Das Verfahren gemäß der Erfindung sieht also eine Erzeugungseinrichtung, eine Verschiebungseinrichtung und eine Zusammenführungseinrichtung vor, die zusammen als Ausgangsstrahl einen Laserstrahl mit einer Pulsdauer erzeugen, die zum einen von der zeitlichen Verschiebung abhängt, da eine Vergrößerung der zeitlichen Verschiebung zu einer Vergrößerung der Pulsdauer des Ausgangsstrahls führt, und somit steuerbar ist und zum anderen größer als die Pulsdauer (im folgenden auch als "Normalpulsdauer" bezeichnet) des verwendeten PulsLasers ist. Die drei Einrichtungen bilden somit zusammen ein Lasersystem mit steuerbarer Pulsdauer.

Wenn beispielsweise als PulsLaser der bisher schon für die Laser-Annealing-Technik verwendete Excimer-Laser mit einer Normalpulsdauer von 60 ns verwendet wird, dann kann das Lasersystem im einfachsten Falle zwei Laserstrahlen mit einer Pulsdauer von jeweils 60 ns erzeugen und den zweiten dieser beiden Laserstrahlen zeitlich um einen steuerbaren Betrag von beispielsweise 50 ns gegenüber dem ersten Laserstrahl verschieben, so dass nach dem Zusammenführen dieser beiden Laserstrahlen der von dem Lasersystem abgegebene Ausgangsstrahl eine Pulsdauer von ungefähr 110 ns (= 60 ns + 50 ns) aufweist.

Die Steuerung der Pulsdauer ist mit einer Genauigkeit von einigen Nanosekunden oder weniger möglich und wird gemäß der Erfindung zur Regelung des Temperaturprofils eingesetzt. Sie ermöglicht qualitativ höherwertige und gleichmäßigere Ergebnisse, da Abweichungen von dem gewünschten Temperaturprofil genau und schnell korrigiert werden können.

Die Vergrößerung der Pulsdauer führt bei gleichbleibender Pulsenergie und Wellenlänge zu einem flacheren Temperaturgradienten in der Keramikschiicht und ermöglicht eine homogenere und sozusagen schonendere Behandlung der Keramikschiicht, eine höhere Vorschubgeschwindigkeit, eine niedrigere Flächenleistungsdichte und eine größere Kristallisationstiefe.

Weitere Merkmale und Ausbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen beschrieben.

Bevorzugt ist vorgesehen, dass die Pulsdauer in Abhängigkeit von der Temperatur des bestrahlten Oberflächenbereichs der Keramikschiicht geregelt wird. Dabei kann die Temperaturüberwachung durch Messung des von dem bestrahlten Oberflächenbereich reflektierten Laserlichts oder durch Messung der von dem bestrahlten Oberflächenbereich emittierten Wärmestrahlung erfolgen.

Gemäß einer ersten Variante des in dem Verfahren eingesetzten Lasersystems ist vorgesehen, dass:

- die Erzeugungseinrichtung einen zweiten PulsLaser aufweist, wobei der erste Laser den ersten Laserstrahl und der zweite Laser den zweiten Laserstrahl aussendet; und
- die Verschiebungseinrichtung eine Zeitschaltuhr aufweist, die derart ausgebildet ist, dass zuerst der erste Laser und dann mit einer einstellbaren Verzögerungszeit der zweite Laser gezündet wird.

Ein Vorteil dieser ersten Variante liegt darin, dass sich der zweite PulsLaser hinsichtlich der Wellenlänge des von ihm ausgesendeten zweiten Laserstrahls von dem ersten PulsLaser unterscheiden kann. Dies kann beispielsweise durch Verwendung eines anderen Lasermaterials oder bei baugleichen Lasern durch eine andere Abstimmung erreicht werden. Der dann von dem Lasersystem abgegebene Ausgangsstrahl

weist folglich zwei Wellenlängenanteile auf, was beispielsweise bei den komplexen Vorgängen, die bei der Laser-Annealing-Technik von elektrokeramischen Dünnschichten auftreten, gewünscht sein kann. Außerdem wird durch den zweiten Laser auch die Energie des Ausgangsstrahls im Vergleich zu einem Lasersystem, das mit nur einem PulsLaser arbeitet, erhöht.

Die Steuerung der Pulsdauer erfolgt hier durch Änderung der Verzögerungszeit. Gemäß einer zweiten Variante des in dem Verfahren eingesetzten Lasersystems ist vorgesehen, dass:

- die Erzeugungseinrichtung einen Strahlteiler aufweist, der den von dem Laser ausgesendeten Laserstrahl in den ersten und den zweiten Laserstrahl aufteilt; und
- die Verschiebungseinrichtung eine einstellbare optische Verzögerungsstrecke für den zweiten Laserstrahl aufweist.

Bei dieser zweiten Variante liegt ein Vorteil darin, dass im Unterschied zu der ersten Variante lediglich ein Laser erforderlich ist, um die beiden Laserstrahlen zu erzeugen.

Die Steuerung der Pulsdauer erfolgt hier durch Änderung der optischen Verzögerungsstrecke.

Diese zweite Variante kann auch mit der ersten Variante kombiniert werden, um beispielsweise vier Laserstrahlen zu erzeugen, die zeitlich gegeneinander verschoben sind und einen Ausgangsstrahl mit einer noch größeren Pulsdauer ermöglichen. Hierzu kann zu den beiden Lasern der ersten Variante jeweils eine Erzeugungseinrichtung und eine Verschiebungseinrichtung gemäß der zweiten Variante vorgesehen sein.

Im Falle der zweiten Variante kann vorgesehen sein, dass die optische Verzögerungsstrecke durch eine Spiegelanordnung gebildet wird, die einen Eingangsspiegel und einen Ausgangsspiegel aufweist, die derart angeordnet sind, dass der zweite Laserstrahl von dem Strahlteiler auf den Eingangsspiegel trifft und zu dem Ausgangsspiegel umgelenkt wird, der ihn zu der Zusammenführungseinrichtung umlenkt.

Da der zweite Laserstrahl den Umweg von dem Strahlteiler über den Eingangsspiegel und den Ausgangsspiegel bis zu der Zusammenführungseinrichtung zurücklegen muss, kommt er dort zu einem späteren Zeitpunkt an als der erste Laserstrahl, der nur den direkten Weg von dem Strahlteiler zu der Zusammenführungseinrichtung zurücklegen musste. Der zweite Laserstrahl ist somit zeitlich gegenüber dem ersten Laserstrahl verschoben. Wenn die Lichtgeschwindigkeit mit  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s angenommen wird, führt folglich ein Umweg von 1 m zu einer Zeitverschiebung von 3,3 ns ( $= 1 \text{ m} : 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ).

Dann kann weiter vorgesehen sein, dass die Spiegelanordnung wenigstens zwei Zwischenspiegel aufweist, die derart angeordnet sind, dass der zweite Laserstrahl von dem Eingangsspiegel über die Zwischenspiegel zu dem Ausgangsspiegel umgelenkt wird.

Mit den Zwischenspiegeln kann die Länge des Umweges, den der zweite Laserstrahl zurücklegen muss, deutlich vergrößert werden, ohne dass auch der Platzbedarf der Spiegelanordnung entsprechend ansteigt.

Vorteilhafterweise ist dann vorgesehen, dass die Zwischenspiegel in zwei parallelen Reihen jeweils äquidistant derart angeordnet sind, dass der zweite Laserstrahl von dem Eingangsspiegel auf den ersten Zwischenspiegel in der ersten Reihe trifft und zu dem ersten Zwischenspiegel in der zweiten Reihe umgelenkt wird und nacheinander zwischen den Zwischenspiegeln der beiden Reihen hin- und herläuft,

bis er von dem letzten Zwischenspiegel der ersten Reihe auf den letzten Zwischenspiegel der zweiten Reihe trifft und zu dem Ausgangsspiegel umgelenkt wird.

Mit dieser Anordnung der Zwischenspiegel wird ein besonders kompakter und regelmäßiger Aufbau der Spiegelanordnung ermöglicht.

Vorzugsweise ist vorgesehen, dass die Zusammenführungseinrichtung einen teildurchlässigen Spiegel aufweist.

Im folgenden werden bevorzugte Ausführungsbeispiele anhand der beigefügten Zeichnungen näher beschrieben.

**Fig. 1** zeigt in einer Draufsicht schematisch den Aufbau eines in einem Verfahren zur Herstellung einer kristallisierten keramischen Schicht durch Laser-Annealing eingesetzten Lasersystems mit steuerbarer Pulsdauer in einer ersten Ausführungsform;

**Fig. 2** zeigt in einer Draufsicht schematisch den Aufbau eines in einem Verfahren zur Herstellung einer kristallisierten keramischen Schicht durch Laser-Annealing eingesetzten Lasersystems mit steuerbarer Pulsdauer in einer zweiten Ausführungsform, die eine optische Verzögerungsstrecke in einer ersten Ausführungsform aufweist;

**Fig. 3** zeigt in einer Draufsicht schematisch den Aufbau einer optischen Verzögerungsstrecke in einer zweiten Ausführungsform, bei der maximale Umweg eingestellt ist; und

**Fig. 4** zeigt die optische Verzögerungsstrecke der **Fig. 3**, bei der jedoch ein um einen Schritt verkürzter Umweg eingestellt ist.

In den **Fig. 1** und **2** ist ein in einem Verfahren zur Herstellung einer kristallisierten keramischen Schicht durch Laser-Annealing eingesetztes Lasersystem mit steuerbarer Pulsdauer in zwei Ausführungsformen dargestellt, die sich grundlegend voneinander unterscheiden, wie im folgenden näher erläutert werden wird. Gemäß den **Fig. 1** und **2** weist das Lasersystem eine Erzeugungseinrichtung **10**, eine Verschiebungseinrichtung **12** und eine Zusammenführungseinrichtung **14** auf. Die Erzeugungseinrichtung **10** dient dazu, einen ersten gepulsten Laserstrahl **16** und einen von diesem räumlich getrennten zweiten gepulsten Laserstrahl **18** zu erzeugen. Die Verschiebungseinrichtung **12** dient dazu, den zweiten Laserstrahl **18** zeitlich gegenüber dem ersten Laserstrahl **16** zu verschieben. Die Zusammenführungseinrichtung **14** dient dazu, die beiden räumlich getrennten Laserstrahlen **16**, **18** zusammenzuführen, so dass sie einen Ausgangsstrahl **20** mit der gewünschten Pulsdauer abgibt.

Gemäß der **Fig. 1** weist bei der ersten Ausführungsform des Lasersystems die Erzeugungseinrichtung **10** einen ersten Puls-Laser **22**, der den ersten Laserstrahl **16** aussendet, und einen zweiten Puls-Laser **24** auf, der den zweiten Laserstrahl **18** aussendet. Außerdem weist bei dieser ersten Ausführungsform die Verschiebungseinrichtung eine Zeitschaltuhr **26** auf, die derart ausgebildet ist, dass zuerst der erste Laser **22** und dann mit einer einstellbaren Verzögerungszeit der zweite Laser **24** gezündet wird. Die Zusammenführungseinrichtung **14** umfasst hier einen teildurchlässigen Spiegel **28**, der bevorzugt dichroitisch ist.

Wie in der **Fig. 1** gut zu erkennen ist, laufen die beiden Laserstrahlen **16**, **18** in der Horizontalebene (die der Zeichenebene entspricht) rechtwinklig zueinander. Im Schnittpunkt beider Laserstrahlen **16**, **18** ist der teildurchlässige Spiegel **28** derart angeordnet, dass seine unverspiegelte Seite unter einem Winkel von  $45^\circ$  zu dem ersten Laserstrahl **16** und seine reflektierende Seite unter einem Winkel von ebenfalls  $45^\circ$  zu dem zweiten Laserstrahl **18** steht. Außerdem sind die beiden Laser **22**, **24** derart angeordnet, dass der erste Laserstrahl **16** dieselbe Wegstrecke bis zu dem teildurchlässigen Spiegel **28** zurücklegen muss wie der zweite Laserstrahl. Folglich treffen die einzelnen Impulse des zweiten Laserstrahls **18** um die durch die Zeitschaltuhr **26** vorge-

gebene Verzögerungszeit später bei dem teildurchlässigen Spiegel **28** ein als diejenigen des ersten Laserstrahls **16**. Da der erste Laserstrahl **16** den teildurchlässigen Spiegel **28** nahezu ohne Richtungsänderung durchdringt, der zweite Laserstrahl **18** hingegen an dem teildurchlässigen Spiegel **28** um  $90^\circ$ , das heißt in der **Fig. 1** von rechts nach unten, umgelenkt wird, sind die beiden Laserstrahlen **16**, **18**, die vor dem teildurchlässigen Spiegel **28** räumlich getrennt sind, hinter dem teildurchlässigen Spiegel **28** nun zusammengeführt und bilden durch Überlagerung den Ausgangsstrahl **20**. Da die Taktfrequenz, mit der die beiden Laser **22**, **24** gezündet werden, gleich ist, und die Impulse des zweiten Laserstrahls **18** zeitlich gegenüber denen des ersten Laserstrahls **16** verschoben sind, entspricht die Pulsfrequenz des Ausgangsstrahls **20**, wie auch die der beiden Laserstrahlen **16**, **18**, der Taktfrequenz der beiden Laser **22**, **24**, wohingegen seine Pulsdauer entsprechend der Überlagerung der beiden Laserstrahlen **16**, **18** größer als deren Pulsdauern ist. Die Pulsdauer des Ausgangsstrahls **20** kann demnach durch Verstellen der Verzögerungszeit mit Hilfe der Zeitschaltuhr **26** nach Wunsch gesteuert werden.

Eine Einstellung der Verzögerungszeit ist mit einer Genauigkeit im Nanosekundenbereich leicht auf mikroelektronischem Wege erreichbar, so dass auch die Pulsdauer des Ausgangsstrahls **20** mit dieser Genauigkeit eingestellt werden kann. Der Ausgangsstrahl **20** mit der gewünschten Pulsdauer kann dann beispielsweise im Falle der Laser-Annealing-Technik wie gewohnt über die elektrokeramische dünnschicht geführt werden.

Die verwendeten Laser **22**, **24** können bei derselben Wellenlänge arbeiten, es ist jedoch auch möglich, verschiedene Wellenlängen zu wählen, die dann auch in dem Ausgangsstrahl **20** enthalten sind.

Außerdem können nach Bedarf auch mehr als die beiden Puls-Laser **22**, **24** vorgesehen sein, um beispielsweise noch eine weitere Wellenlänge in dem Ausgangsstrahl **20** zur Verfügung zu haben und/oder die Pulsdauer des Ausgangsstrahls **20** noch größer machen zu können. Ein (nicht dargestellter) dritter Laser könnte beispielsweise in der **Fig. 1** unterhalb des zweiten Lasers **24** vorgesehen sein, der einen dritten Laserstrahl parallel zu dem zweiten Laserstrahl **18** erzeugt und ebenfalls mit der Zeitschaltuhr **26** verbunden ist. Diese Zeitschaltuhr **26** ist dann so ausgebildet, dass der dritte Laser mit einer eigenen einstellbaren Verzögerungszeit nach dem zweiten Laser **24** gezündet wird. An dem Schnittpunkt zwischen dem dritten Laserstrahl und dem Ausgangsstrahl **20** kann dann ein (nicht dargestellter) zweiter teildurchlässiger Spiegel vorgesehen sein, der wie der dargestellte teildurchlässige Spiegel **28** den Ausgangsstrahl **20** und den dritten Laserstrahl zusammenführt.

Gemäß der **Fig. 2** weist bei der zweiten Ausführungsform des Lasersystems die Erzeugungseinrichtung **10** einen einzigen Puls-Laser **30** und einen Strahlteiler **32** auf, der den von dem Laser **30** ausgesendeten Laserstrahl **34** in den ersten Laserstrahl **16** und den zweiten Laserstrahl **18** aufteilt. Außerdem weist bei dieser zweiten Ausführungsform die Verschiebungseinrichtung **12** eine einstellbare optische Verzögerungsstrecke **36** für den zweiten Laserstrahl **18** auf. Die Zusammenführungseinrichtung **14** ist hier wie bei der ersten Ausführungsform der **Fig. 1** ein teildurchlässiger Spiegel **28**, der den ersten Laserstrahl **16** und den zweiten Laserstrahl **18**, nachdem dieser die optische Verzögerungsstrecke **36** durchlaufen hat, zu dem Ausgangsstrahl **20** zusammenführt.

Bei dieser zweiten Ausführungsform des Lasersystems wird also der zweite Laserstrahl **18** dadurch zeitlich gegenüber dem ersten Laserstrahl **16** verschoben, dass er über den Umweg durch die optische Verzögerungsstrecke **36** zu dem

teildurchlässigen Spiegel 28 geführt wird. So führt beispielsweise ein Umweg von 1 m zu einer zeitlichen Verschiebung von 3,3 ns ( $= 1 \text{ m} : 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ).

Da der zweite Laserstrahl 18 ab dem Strahlteiler 32 einen deutlich längeren Weg bis zu dem teildurchlässigen Spiegel 28 als der erste Laserstrahl 16 zurücklegen muss, ist gemäß der Fig. 2 zwischen der Erzeugungseinrichtung 10 und der optischen Verzögerungsstrecke 36 ein Fernrohr 38 (schematisch durch eine Konkavlinse dargestellt) zur Aufweitung des zweiten Laserstrahls 18 vorgesehen. Damit wird eine Verringerung der Strahldispersion erreicht. Diese Aufweitung wird mit Hilfe einer Fokussierungsoptik 40 (schematisch durch eine Konvexlinse dargestellt) rückgängig gemacht, die zwischen dem Ausgang der optischen Verzögerungsstrecke 36 und dem teildurchlässigen Spiegel 28 vorgesehen ist.

Das Lasersystem der Fig. 2 weist eine optische Verzögerungsstrecke 36 in einer ersten Ausführungsform auf. Bei dieser ersten Ausführungsform wird die Verzögerungsstrecke 36 durch eine Spiegelanordnung gebildet, die einen Eingangsspiegel 42 und einen Ausgangsspiegel 44 aufweist. Diese beiden Spiegel 42, 44 sind auf einem gemeinsamen Schlitten 46 angebracht, der zur Einstellung des Umweges rechtwinklig zu dem ersten Laserstrahl 16, das heißt in der Fig. 2 nach links und rechts, verschoben werden kann.

Der Eingangsspiegel 42 und der Ausgangsspiegel 44 sind so auf dem Schlitten 46 angeordnet, dass der zweite Laserstrahl 18 von dem Strahlteiler 32 auf den Eingangsspiegel 42 trifft, der ihn zu dem Ausgangsspiegel 44 umlenkt, der ihn wiederum zu dem teildurchlässigen Spiegel 28 umlenkt. Dies wird beispielsweise gemäß der Fig. 2 dadurch erreicht, dass der Eingangsspiegel 42 unter einem Winkel von  $45^\circ$  nach unten zu dem von links einfallenden zweiten Laserstrahl 18 weist und diesen folglich rechtwinklig nach unten zu dem Ausgangsspiegel 44 reflektiert, der unter einem Winkel von ebenfalls  $45^\circ$  nach links zu dem von oben einfallenden zweiten Laserstrahl 18 weist und diesen folglich rechtwinklig nach links zu dem teildurchlässigen Spiegel 28 reflektiert.

Der Abstand zwischen dem Eingangsspiegel 42 und dem Ausgangsspiegel 44 ist hier gleich dem Abstand zwischen dem Strahlteiler 32 und dem teildurchlässigen Spiegel 28 gewählt, so dass der zweite Laserstrahl 18 zwischen dem Eingangsspiegel 42 und dem Ausgangsspiegel 44 dieselbe Entfernung zurücklegen muss wie der erste Laserstrahl 16 zwischen dem Strahlteiler 32 und dem teildurchlässigen Spiegel 28. Demnach wird der Umweg des zweiten Laserstrahls 18 relativ zu dem ersten Laserstrahl 16 durch den Abstand zwischen dem Eingangsspiegel 42 und dem Strahlteiler 32 und den Abstand zwischen dem Ausgangsspiegel 44 und dem teildurchlässigen Spiegel 28 bestimmt, die hier gleich groß sind. Wenn nun in der Fig. 2 der Schlitten 46 um 0,5 m nach rechts verschoben wird, dann vergrößert sich der Umweg um 1 m ( $= 2 \cdot 0,5 \text{ m}$ ), was einer zeitlichen Verschiebung des zweiten Laserstrahls 18 gegenüber dem ersten Laserstrahl 16 von 3,3 ns entspricht.

Die Fig. 3 zeigt eine zweite Ausführungsform der optischen Verzögerungsstrecke 36. Bei dieser zweiten Ausführungsform sind zusätzlich zu dem Eingangsspiegel 42 und dem Ausgangsspiegel 44 wenigstens zwei Zwischenspiegel 48, 50 vorgesehen, die derart angeordnet sind, dass der zweite Laserstrahl 18 von dem Eingangsspiegel 42 über die Zwischenspiegel 48, 50 zu dem Ausgangsspiegel 44 umgelenkt wird.

Gemäß der Fig. 2 wird dies beispielsweise mit insgesamt 6 Zwischenspiegeln verwirklicht, die in zwei parallelen Reihen jeweils äquidistant angeordnet sind. Zur besseren Unterscheidung werden im folgenden die Zwischenspiegel in

der ersten Reihe von links nach rechts in der Fig. 3 mit den Bezugszeichen 48.1, 48.2 und 48.3 und die Zwischenspiegel in der zweiten Reihe, die in der Fig. 3 oberhalb der ersten Reihe verläuft, von links nach rechts mit den Bezugszeichen 50.1, 50.2 und 50.3 bezeichnet.

Sämtliche Spiegel 42, 44, 48, 50 der optischen Verzögerungsstrecke 36 sind auf einem gemeinsamen Schlitten 46 angebracht, der wie bei der ersten Ausführungsform der Fig. 2 nach links und rechts in der Fig. 3 zur kontinuierlichen Feineinstellung des Umweges verschoben werden kann.

Die Zwischenspiegel 48, 50 sind derart angeordnet, dass der zweite Laserstrahl 18 von dem Eingangsspiegel 42 auf den ersten Zwischenspiegel 48.1 in der ersten Reihe trifft, der ihn zu dem ersten Zwischenspiegel 50.1 der zweiten Reihe reflektiert. Dieser wiederum reflektiert ihn zu dem zweiten Zwischenspiegel 48.2 der ersten Reihe, der ihn seinerseits zu dem zweiten Zwischenspiegel 50.2 der zweiten Reihe reflektiert. Von dort läuft der zweite Laserstrahl 18 zum dritten Zwischenspiegel 48.3 der ersten Reihe, der ihn auf den dritten Zwischenspiegel 50.3 der zweiten Reihe reflektiert. Dieser schließlich lenkt ihn zu dem Ausgangsspiegel 44 um, der in der Fig. 3 unterhalb der ersten Reihe angeordnet ist, so dass der zweite Laserstrahl 18 ungestört an den Zwischenspiegeln 48 der ersten Reihe vorbei zu dem teildurchlässigen Spiegel 28 laufen kann.

Der zweite Laserstrahl 18 läuft also in einer Zickzacklinie nacheinander zwischen den Zwischenspiegeln 48 der ersten Reihe und den Zwischenspiegeln 50 der zweiten Reihe hin und her. Dadurch wird bei geringem Platzbedarf der optischen Verzögerungsstrecke 36 ein langer Umweg ermöglicht. Da zudem die beiden Reihen parallel verlaufen und die Zwischenspiegel 48, 50 einer jeden Reihe äquidistant angeordnet sind, ergibt sich ein sehr regelmäßiger Verlauf der Zickzacklinie. So stimmen die Reflexionswinkel bei den einzelnen Zwischenspiegeln 48, 50 miteinander überein, und zum anderen sind die von dem zweiten Laserstrahl zurückzulegenden Entfernungen zwischen jeweils zwei aufeinanderfolgenden Zwischenspiegeln, also der Abstand zwischen dem ersten Zwischenspiegel 48.1 der ersten Reihe und dem ersten Zwischenspiegel 50.1 der zweiten Reihe, der Abstand zwischen diesem und dem zweiten Zwischenspiegel der ersten Reihe, und so weiter, ebenfalls gleich. Der Vorteil dieser gleichen Spiegelabstände liegt darin, dass der Umweg auf einfache Art und Weise in gleich großen Schritten verringert werden kann. Zu diesem Zweck ist jeder Zwischenspiegel 48 der ersten Reihe abnehmbar auf dem Schlitten 46 angebracht. Dies kann beispielsweise mit Hilfe von (nicht dargestellten) Verankerungstiften erfolgen, die an den Zwischenspiegeln 48 der ersten Reihe befestigt sind und in (nicht dargestellte) zugehörige Aufnahmeöffnungen in der Oberseite des Schlittens 46 passen.

Wenn nun beispielsweise gemäß der Fig. 4 der dritte Zwischenspiegel 48.3 der ersten Reihe von dem Schlitten 46 abgenommen wird, dann ist zunächst der zickzackförmige Strahlengang des zweiten Laserstrahls 18 an dieser Stelle unterbrochen, so dass der zweite Laserstrahl 18 nicht mehr über den dritten Zwischenspiegel 50.3 der zweiten Reihe zu dem Ausgangsspiegel 44 umgelenkt wird. Als weitere Maßnahme wird der Ausgangsspiegel 44 gemäß der Fig. 4 in eine Position auf dem Schlitten 46 gebracht, in der er den von dem zweiten Zwischenspiegel 50.2 der zweiten Reihe einfallenden zweiten Laserstrahl 18 wieder zu dem teildurchlässigen Spiegel 28 umlenkt. Zu diesem Zweck ist der Ausgangsspiegel 44 verschiebbar auf dem Schlitten 46 angebracht. Da jetzt der dritte Zwischenspiegel 48.3 der ersten Reihe und der dritte Zwischenspiegel 50.3 der zweiten Reihe nicht mehr im Strahlengang des zweiten Laserstrahls 18 liegen, ist dessen Umweg durch die optische Verzögerungs-

rungsstrecke 36 um das Doppelte des Spiegelabstands verringert.

Auf die gleiche Art und Weise lässt sich der Umweg um das Vierfache des Spiegelabstands verringern, indem einfach nicht der dritte Zwischenspiegel 48.3 der ersten Reihe von dem Schlitten 46 abgenommen wird, sondern der zweite Zwischenspiegel 48.2 der ersten Reihe, und indem der Ausgangsspiegel 44 in der Fig. 3 entsprechend weiter nach links verschoben wird. Das gleiche gilt entsprechend bei Abnehmen des ersten Zwischenspiegels 48.1 der ersten Reihe, wodurch der Umweg um das Sechsfache des Spiegelabstands verringert wird.

#### BEZUGSZEICHENLISTE

10	Erzeugungseinrichtung
12	Verschiebungseinrichtung
14	Zusammenführungseinrichtung
16	erster Laserstrahl
18	zweiter Laserstrahl
20	Ausgangsstrahl
22	erster Puls laser
24	zweiter Puls laser
26	Zeitschaltuhr
28	teildurchlässiger Spiegel
30	Puls laser
32	Strahlteiler
34	Laserstrahl
36	optische Verzögerungsstrecke
38	Fernrohr
40	Fokussierungsoptik
42	Eingangsspiegel
44	Ausgangsspiegel
46	Schlitten
48	Zwischenspiegel der ersten Reihe
50	Zwischenspiegel der zweiten Reihe

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung einer kristallisierten keramischen Schicht durch Laser-Annealing, **dadurch gekennzeichnet**, dass:
  - eine Erzeugungseinrichtung (10), die wenigstens einen Puls laser (22, 30) aufweist, einen ersten Laserstrahl (16) und einen von diesem räumlich getrennten zweiten Laserstrahl (18) erzeugt;
  - eine Verschiebungseinrichtung (12) den zweiten Laserstrahl (18) zeitlich gegenüber dem ersten Laserstrahl (16) verschiebt;
  - eine Zusammenführungseinrichtung (14) die beiden räumlich getrennten Laserstrahlen (16, 18) in einem Ausgangsstrahl (20) zusammenführt, wobei die Pulsdauer des Ausgangsstrahls (20) durch Steuerung der zeitlichen Verschiebung des zweiten Laserstrahls (18) gegenüber dem ersten Laserstrahl (16) gesteuert wird; und
  - das Temperaturprofil in der keramischen Schicht durch Steuerung der Pulsdauer des Ausgangsstrahls (20) eingestellt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass:
  - die Erzeugungseinrichtung (10) einen zweiten Puls laser (24) aufweist, wobei der erste Laser (22) den ersten Laserstrahl (16) und der zweite Laser (24) den zweiten Laserstrahl (18) aussendet; und
  - die Verschiebungseinrichtung (12) eine Zeitschaltuhr (26) aufweist, die derart ausgebildet ist, dass zuerst der erste Laser (22) und dann mit einer

einstellbaren Verzögerungszeit der zweite Laser (24) gezündet wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass:

- die Erzeugungseinrichtung (10) einen Strahlteiler (32) aufweist, der den von dem Laser (30) ausgesendeten Laserstrahl (34) in den ersten und den zweiten Laserstrahl (16, 18) aufteilt; und
- die Verschiebungseinrichtung (12) eine einstellbare optische Verzögerungsstrecke (36) für den zweiten Laserstrahl (18) aufweist.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die optische Verzögerungsstrecke (36) durch eine Spiegelanordnung gebildet wird, die einen Eingangsspiegel (42) und einen Ausgangsspiegel (44) aufweist, die derart angeordnet sind, dass der zweite Laserstrahl (18) von dem Strahlteiler (32) auf den Eingangsspiegel (42) trifft und zu dem Ausgangsspiegel (44) umgelenkt wird, der ihn zu der Zusammenführungseinrichtung (14) umlenkt.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Spiegelanordnung wenigstens zwei Zwischenspiegel (48, 50) aufweist, die derart angeordnet sind, dass der zweite Laserstrahl (18) von dem Eingangsspiegel (42) über die Zwischenspiegel (48, 50) zu dem Ausgangsspiegel (44) umgelenkt wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Zwischenspiegel (48, 50) in zwei parallelen Reihen jeweils äquidistant derart angeordnet sind, dass der zweite Laserstrahl (18) von dem Eingangsspiegel (42) auf den ersten Zwischenspiegel (48.1) in der ersten Reihe trifft und zu dem ersten Zwischenspiegel (50.1) in der zweiten Reihe umgelenkt wird und nacheinander zwischen den Zwischenspiegeln (48, 50) der beiden Reihen hin- und herläuft, bis er von dem letzten Zwischenspiegel (48.3) der ersten Reihe auf den letzten Zwischenspiegel (50.3) der zweiten Reihe trifft und zu dem Ausgangsspiegel (44) umgelenkt wird.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Zusammenführungseinrichtung (14) einen teildurchlässigen Spiegel (28) aufweist.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Pulsdauer in Abhängigkeit von der Temperatur des bestrahlten Oberflächenbereichs der Schicht geregelt wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Temperaturüberwachung durch Messung der Reflexion von dem bestrahlten Oberflächenbereich der Schicht erfolgt.

10. Lasersystem, besonders entwickelt zur Ausführung des Verfahrens zur Herstellung einer kristallisierten keramischen Schicht durch Laser-Annealing nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit:

- einer Erzeugungseinrichtung (10), die wenigstens einen Puls laser (22, 30) aufweist und derart ausgebildet ist, dass sie einen ersten Laserstrahl (16) und einen von diesem räumlich getrennten zweiten Laserstrahl (18) erzeugt;
- einer Verschiebungseinrichtung (12), die derart ausgebildet ist, dass sie den zweiten Laserstrahl (18) zeitlich gegenüber dem ersten Laserstrahl (16) verschiebt; und
- einer Zusammenführungseinrichtung (14), die derart ausgebildet ist, dass sie die beiden räumlich getrennten Laserstrahlen (16, 18) in einem Ausgangsstrahl (20) zusammenführt.

11. Lasersystem nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet,



zeichnet, dass:

- die Erzeugungseinrichtung (10) einen zweiten Puls laser (24) aufweist, wobei der erste Laser (22) den ersten Laserstrahl (16) und der zweite Laser (24) den zweiten Laserstrahl (18) aussendet; und 5
- die Verschiebungseinrichtung (12) eine Zeitschaltuhr (26) aufweist, die derart ausgebildet ist, dass zuerst der erste Laser (22) und dann mit einer einstellbaren Verzögerungszeit der zweite Laser (24) gezündet wird. 10

12. Lasersystem nach Anspruch 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, dass:

- die Erzeugungseinrichtung (10) einen Strahlteiler (32) aufweist, der den von dem Laser (30) ausgesendeten Laserstrahl (34) in den ersten und den zweiten Laserstrahl (16, 18) aufteilt; und 15
- die Verschiebungseinrichtung (12) eine einstellbare optische Verzögerungsstrecke (36) für den zweiten Laserstrahl (18) aufweist.

13. Lasersystem nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die optische Verzögerungsstrecke (36) durch eine Spiegelanordnung gebildet wird, die einen Eingangsspiegel (42) und einen Ausgangsspiegel (44) aufweist, die derart angeordnet sind, dass der zweite Laserstrahl (18) von dem Strahlteiler (32) auf den Eingangsspiegel (42) trifft und zu dem Ausgangsspiegel (44) umgelenkt wird, der ihn zu der Zusammenführungseinrichtung (14) umlenkt. 20 25

14. Lasersystem nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Spiegelanordnung wenigstens zwei Zwischenspiegel (48, 50) aufweist, die derart angeordnet sind, dass der zweite Laserstrahl (18) von dem Eingangsspiegel (42) über die Zwischenspiegel (48, 50) zu dem Ausgangsspiegel (44) umgelenkt wird. 30

15. Lasersystem nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Zwischenspiegel (48, 50) in zwei parallelen Reihen jeweils äquidistant derart angeordnet sind, dass der zweite Laserstrahl (18) von dem Eingangsspiegel (42) auf den ersten Zwischenspiegel (48.1) in der ersten Reihe trifft und zu dem ersten Zwischenspiegel (50.1) in der zweiten Reihe umgelenkt wird und nacheinander zwischen den Zwischenspiegeln (48, 50) der beiden Reihen hin- und herläuft, bis er von dem letzten Zwischenspiegel (48.3) der ersten Reihe auf den letzten Zwischenspiegel (50.3) der zweiten Reihe trifft und zu dem Ausgangsspiegel (44) umgelenkt wird. 35 40 45

16. Lasersystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Zusammenführungseinrichtung (14) einen teildurchlässigen Spiegel (28) aufweist. 50

---

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

---

55

60

65

- Leerseite -

FIG. 1

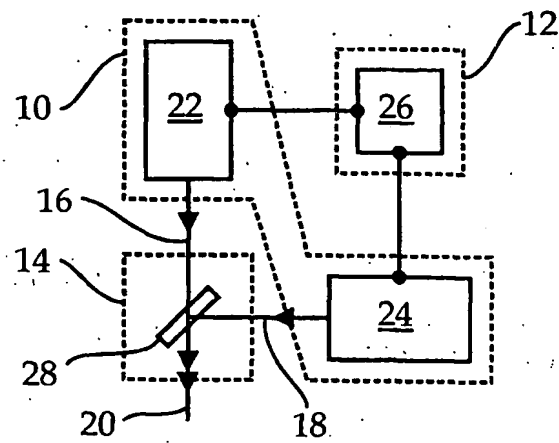


FIG. 2

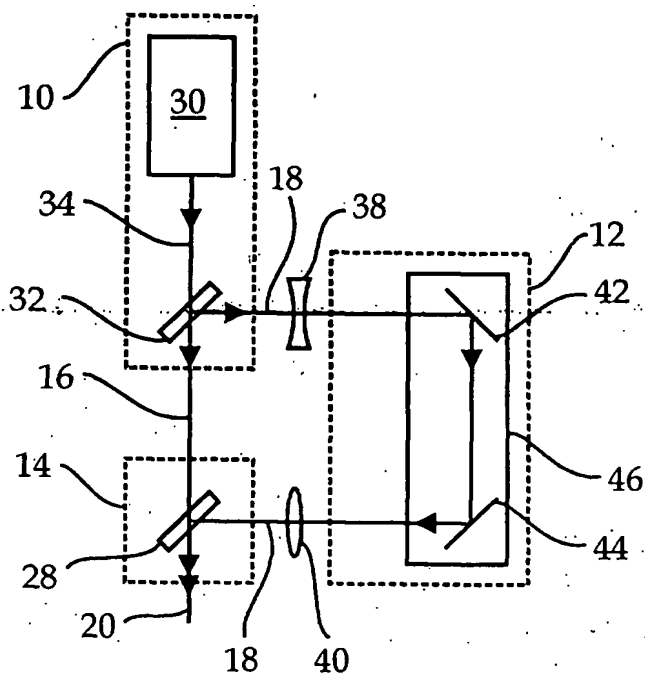


FIG. 3

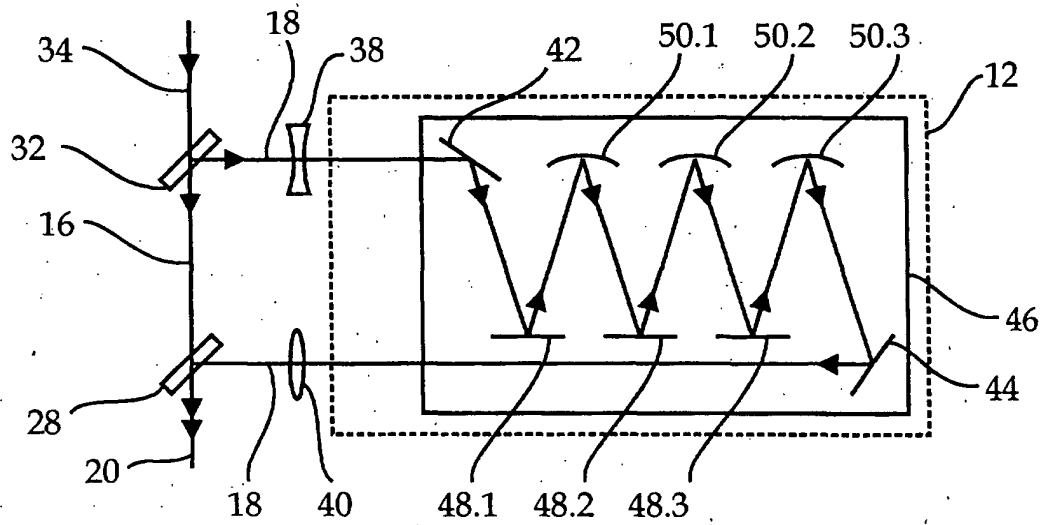


FIG. 4

